

Informes de la Construcción
Vol. 65, 529, 65-76,
enero-marzo 2013
ISSN: 0020-0883
eISSN: 1988-3234
doi: 10.3989/ic.11.123

Estimación temprana del nivel de sostenibilidad de estructuras de hormigón, en el marco de la instrucción española EHE-08

Early estimation of the sustainability level of concrete structures, in the framework of the EHE-08 spanish code

D. Gómez-López^(*), A. del Caño^(*), M. P. de la Cruz^(*)

RESUMEN

La Instrucción española de Hormigón Estructural (EHE-08) supone una experiencia pionera internacionalmente, al incluir un modelo para evaluar la sostenibilidad estructural. Dicho modelo supone la consideración de diversos aspectos medioambientales, sociales y económicos, algunos de los cuales no se conocerán con certeza hasta la culminación de la obra. Para poder cumplir el objetivo de sostenibilidad resulta necesario realizar evaluaciones periódicas realistas del modelo, durante todo el proyecto. Ello permitirá tener una idea clara de las posibilidades de cumplimiento de dicho objetivo, con objeto de tomar decisiones eficaces en tiempo útil. En este artículo se aporta la información necesaria para realizar evaluaciones adecuadas en fases tempranas del proyecto. Por otro lado, al tratarse de una normativa pionera, el usuario puede encontrarse con dudas o problemas a la hora de interpretarla y aplicarla. El segundo objetivo de este artículo es ofrecer soluciones para dichas dudas o problemas.

113-122

Palabras clave: Hormigón estructural; sostenibilidad; evaluación; estimaciones; normativa; gestión del proyecto.

SUMMARY

The Spanish Structural Concrete Code is a pioneering initiative, including a model for assessing structural sustainability, taking into account different environmental, social and economic issues. Many of them can not be known with certainty until the end of the construction. The success in the achievement of the initially established sustainability objective can only be reached performing realistic, periodical assessments, all along the project life-cycle. This will allow having a clear idea of the likelihood of achieving that objective, in order of making effective decisions in good time. This paper contributes to the adequate structural assessment in early stages of the project. On the other hand, since this was the first time a sustainability assessment technique has been included in a structural code, the user can have difficulties or doubts for interpreting and applying it. The second objective of this paper is solving those problems.

Keywords: Concrete structures; sustainability; assessment; estimating; standards and codes; project management.

^(*) Escuela Politécnica Superior, Universidad de La Coruña (España).
Persona de contacto/Corresponding author: alfredo@udc.es (A. del Caño).

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Aspectos generales. Objetivos del presente trabajo

La Instrucción española de Hormigón Estructural vigente (EHE-08) (1) ha supuesto muchos cambios, entre los que se encuentra un planteamiento general de sostenibilidad, no existente hasta la fecha. Ello incluye, por un lado, un articulado que tiene en cuenta diversas estrategias para evitar un consumo innecesario de materiales, como es el caso del fomento del uso de la probeta cúbica, así como para promover un uso racional de la energía favoreciendo, por ejemplo, la producción de cementos con combustibles alternativos que permitan el ahorro de otros cuya utilización suponga un peligro mayor para la sostenibilidad.

Se han establecido medidas prácticas para aumentar el nivel de sostenibilidad estructural. Entre otras cosas, la EHE se ha estructurado de manera que se pueda analizar todo el ciclo de vida de la estructura, desde su concepción hasta su demolición, estableciendo posibles acciones para disminuir los impactos sobre el medio ambiente. Se ha potenciado el uso de subproductos y residuos de otras actividades, como el humo de sílice, las cenizas volantes, la chatarra, o el árido procedente de reciclaje, entre otros aspectos. Finalmente, con el Anejo 13 (en adelante, el anejo) se da al técnico la posibilidad de cuantificar la contribución de las estructuras a la sostenibilidad, mediante el denominado Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES).

Por un lado, el sector se encuentra en un período de crisis, probablemente la más grave y de mayor crudeza de las últimas seis décadas. Esto hace que los aspectos relacionados con la sostenibilidad no se encuentren entre los prioritarios; en particular, por ejemplo, la sostenibilidad implica pensar en los costes del ciclo de vida de la estructura (construcción, explotación, desactivación), pero hoy en día lo que prima es la preocupación por el mero coste de inversión. Por otro lado, el anejo no es de obligado cumplimiento, y el proyectista, salvo exigencia en contra por parte de su cliente, tiende a no aplicarlo para no hacer todavía más complicado el ya de por sí complejo proceso de proyectar estructuras. Por último, no hay que olvidar que introducir novedades en un sector tradicionalmente conservador siempre requiere cierto tiempo y esfuerzo, y tanto más en este caso, si se trata de aspectos alejados de lo tensional, de las deformaciones, y del propio dimensionamiento. Todo ello ha supuesto hasta ahora una aplicación escasa del ane-

jo, si bien se nota una progresiva preocupación al respecto entre los técnicos del sector, tanto en España como en otros países avanzados.

Cumple, pues, allanar el camino a dicha aplicación, de las maneras que resulten más oportunas. Aportar información que permita realizar estimaciones periódicas del ICES en momentos tempranos del proyecto es una de ellas, y este es el objetivo esencial de este artículo. Dicha información servirá para realizar estimaciones realistas y prudentes, y con ello aumentar las posibilidades de cumplir el objetivo de sostenibilidad inicialmente establecido.

La EHE sólo aborda la manera de calcular el ICES, sin apenas entrar en otras consideraciones. Por otro lado, dicho cálculo implica estimar variables relacionadas tanto con el proyecto como con la ejecución, existiendo incertidumbre acerca del posible valor final de muchas de ellas. En algunos casos esta falta de certidumbre se prolonga casi hasta el final de la ejecución. De acuerdo con su articulado, para aplicar el anejo resulta necesario establecer un objetivo de sostenibilidad. Tras ello se plantea la realización de una estimación inicial del ICES en el momento de redactar el proyecto. Finalmente, se establece un cálculo definitivo del ICES, cuando la obra ha terminado. El lector familiarizado con la realidad de una obra, con la incertidumbre que la rodea y con los cambios o modificados que suelen surgir, comprenderá fácilmente que dicha dinámica llevará a sorpresas desagradables con bastante frecuencia. Para evitar que la probabilidad de incumplimiento del objetivo de sostenibilidad sea alta se necesita realizar una tarea continua de gestión de dicho objetivo, a todo lo largo del ciclo de vida del proyecto, y para ello es necesario realizar estimaciones periódicas del ICES.

Por otro lado, aplicar una normativa pionera suele suponer para el técnico problemas diversos. Como punto de partida para el desarrollo de varios modelos para analizar la incertidumbre inherente a la gestión del objetivo de sostenibilidad (2) los autores, dos de los cuales participaron en la redacción del anejo, han procedido a analizar en detalle dicho texto y su metodología de base, y a aplicarlo a diversos proyectos (3) (4) (5). Como resultado de ello se han detectado diferentes problemas y dudas que se le pueden plantear al usuario. Algunas surgen al intentar estimar el ICES en momentos tempranos del proyecto, en el momento de redactar el proyecto facultativo e incluso más tarde, antes de que la ejecución esté suficientemente avanzada. En dichos momentos existe bastante incertidumbre acerca del

valor final que pueden tomar algunos parámetros del ICES. Otras tienen que ver con la manera de aplicar o interpretar el anejo. Los autores han considerado necesario resolver también estas últimas, por existir interrelaciones con el objetivo esencial de este artículo, y por suponer un complemento imprescindible para el mismo.

El lector interesado en conocer un resumen del método de base usado en el anejo puede consultar la referencia (3). Por su parte, si desea obtener los detalles completos del mismo y profundizar al máximo en las técnicas usadas, debe consultar la referencia (4). Por último, las publicaciones (3) y (6) muestran ejemplos de aplicación del anejo a casos prácticos.

1.2. Aspectos metodológicos

En cuanto a la estimación del ICES en fases tempranas del proyecto, primeramente se ha aplicado el anejo a diferentes casos prácticos. Tras ello se han realizado entrevistas a proyectistas, empresas relacionadas con la fabricación de estructuras de hormigón y otros expertos en la materia, así como determinados análisis de la situación actual del mercado, en relación con determinadas variables del ICES. A partir de ello se han establecido recomendaciones para realizar estimaciones suficientemente prudentes de dicho índice.

En lo relativo a la interpretación y aplicación del anejo, se ha estudiado a fondo el texto de la instrucción, y se ha consultado el borrador final del grupo de trabajo que lo redactó, y que fue sometido a exposición pública. Téngase en cuenta que en la redacción de una instrucción de este tipo, dicho grupo no tiene control total sobre el resultado final, ya que tras su intervención se abre un período de exposición pública y cualquier persona física o jurídica puede proponer modificaciones que, de ser aceptadas (en este caso, por la Comisión Permanente del Hormigón), modifican el borrador preparado por el grupo. Por otro lado, se han mantenido conversaciones con responsables del Ministerio de Fomento y con algunos otros miembros del mencionado grupo de trabajo.

2. ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE SOSTENIBILIDAD EN FASES TEMPRANAS DEL PROYECTO

Como resultado de todo lo anterior, se incluyen a continuación diversas soluciones para determinados problemas que surgen al realizar estimaciones tempranas del ICES. Se comentan también las maneras de resolver los principales problemas relacionados

con la interpretación y aplicación del anejo. Para el lector que no esté muy familiarizado con el Anejo puede resultar útil realizar una lectura simultánea de cada uno de los apartados de este epígrafe junto con la del correspondiente apartado de la Instrucción, así como resolver ejemplos o casos reales mediante la aplicación informática MIVES-EHE-08-V01.05-VMFom, desarrollada por los autores, que puede descargarse de forma gratuita en (7). Se trata de una herramienta amigable cuyo objeto es hacer más fácil y cómoda la aplicación de la Instrucción y fomentar, con ello, el proyecto sostenible de estructuras de hormigón. Se suministra en la forma de una plantilla de libro electrónico de *Microsoft Excel*. Incluye sus propias instrucciones de uso, pantallas de introducción de datos para cada criterio de sostenibilidad, y una pantalla de salida de resultados, en la que se incluye un resumen de todos los cálculos realizados. Permite efectuar un sencillo análisis de sensibilidad; el usuario puede hacer modificaciones en los datos de entrada observando de inmediato cómo varían los índices de sostenibilidad, identificando qué puede hacer que el ICES aumente o disminuya, y obteniendo información que le permita comparar también, por ejemplo, las consecuencias que tiene conseguir un mismo aumento del ICES de diferentes maneras (en plazo o costes, entre otras). El lector interesado puede encontrar más información acerca de esta aplicación y de su uso en (8).

2.1. Criterio medioambiental de caracterización del hormigón

Vamos a tratar ahora los aspectos incluidos en este primer criterio, en el cual se trata de valorar la sensibilidad medioambiental de las centrales de fabricación del hormigón y de los procedimientos de puesta en obra del mismo. Para ello se evalúa la condición medioambiental (certificación, compromiso) que tienen los suministradores de hormigón y la empresa constructora, teniendo en cuenta las distancias de transporte.

2.1.1. Condición medioambiental de las empresas suministradoras de hormigón o de prefabricados, y de la empresa constructora

Lo habitual es que durante la fase de proyecto se desconozcan cuáles van a ser las empresas suministradoras de hormigón preparado, las de estructura prefabricada y la empresa constructora con la que se contratará la obra. Para poder realizar una estimación del ICES es necesario saber si dichas empresas van a tener o no certificación o, por lo menos, compromiso medioambiental. En este momento, como

se ha anticipado, existe incertidumbre acerca de su posible condición medioambiental.

Si se trata de una central de hormigón preparado y el técnico dispone de tiempo para ello, la mejor opción es realizar un pequeño estudio de las centrales más próximas a la obra, y a partir de ello determinar la condición medioambiental más habitual de las empresas de la zona. Por ejemplo, en el área de influencia de Coruña y Ferrol la tendencia es que las empresas vayan adquiriendo el distintivo medioambiental ISO 14001, y aquellas que no lo tienen, al menos suelen cumplir con los requisitos establecidos por el Anejo para considerar que tienen compromiso medioambiental.

Para las instalaciones de elementos prefabricados se podría hacer un estudio parecido, pero ahora las distancias de transporte son mucho mayores, normalmente de hasta 200 ó 300 Km, pudiendo llegar a más de 1.000 Km en obras especiales. Por tanto, la zona de influencia del análisis podría tener que ser bastante mayor que antes. Otra opción es considerar directamente que estas instalaciones tendrán distintivo medioambiental, ya que hoy en día prácticamente todas las empresas de elementos prefabricados de cierto tamaño tienen algún distintivo de este tipo, ya sea ISO 14001 o EMAS. Con mayor razón, si se trata de una obra con gran cantidad de elementos prefabricados lo normal será recurrir a una empresa suministradora de cierta entidad, y por tanto parece lógico estimar que estará en posesión de un distintivo medioambiental.

El caso de las centrales de hormigón en obra es diferente, porque al ser instalaciones temporales no es posible conocer de antemano su condición medioambiental. Por un lado, se puede pensar que al ser instalaciones temporales será poco probable que las empresas correspondientes realicen la inversión necesaria para certificarlas. Por otro lado, los requisitos que impone el Anejo para considerar que dicha instalación tiene compromiso medioambiental no son excesivamente exigentes, y afectan a aspectos que debería poder cumplir con cierta facilidad una instalación de este tipo. Finalmente, las obras en las cuales se instalan centrales de obra suelen ser importantes y, en consecuencia, las empresas adjudicatarias suelen estar certificadas medioambientalmente, y eso influye sobre la posible condición medioambiental de la central de obra. Por lo tanto, suponer que una central de este tipo tendrá compromiso medioambiental puede ser una opción suficientemente conservadora, si se trata de una obra de gran tamaño.

Por último, están las empresas constructoras. Todas las grandes empresas de este tipo están certificadas medioambientalmente. Además, resulta prudente pensar que una mediana empresa va a tener, como mínimo, compromiso (muchas de ellas están certificadas), y que una empresa de pequeño tamaño no va a tener ni distintivo, ni compromiso. A su vez, en tiempos de bonanza económica lo más probable es que el tamaño de la estructura esté directamente relacionado con el de la empresa constructora. En momentos de crisis esto no es así, ya que las grandes empresas pueden llegar a ofertar prácticamente todo lo que salga a licitación en el mercado. Ante la incertidumbre que ello supone, lo oportuno en este tipo de períodos es adoptar un criterio de prudencia, realizando estimaciones similares a las de tiempos de bonanza.

2.1.2. Suministro de hormigón por parte de diferentes empresas con distinta condición medioambiental

Ocurre con cierta frecuencia que, en obras de tamaño mediano o grande, el hormigón preparado se suministre por más de una empresa. En este caso no siempre todas las empresas van a tener la misma condición medioambiental, y el anejo no aclara cómo actuar en estas situaciones. Lo mismo pudiera suceder cuando se trata de centrales de obra o de prefabricadores, si bien esto es menos frecuente. Lo oportuno aquí es ponderar las correspondientes puntuaciones que el Anejo asocia a cada condición medioambiental, usando como coeficientes de ponderación los respectivos porcentajes de hormigón que suministra cada empresa. La herramienta informática antes mencionada realiza de forma automática estas y otras operaciones que se van a comentar con posterioridad.

2.1.3. Alcance del compromiso medio-ambiental de la empresa constructora

El Anejo establece una serie de requisitos que deben cumplir las empresas suministradoras de hormigón, las de ferralla y las constructoras, para que se pueda considerar que tienen compromiso medioambiental. En el caso de las empresas constructoras se da la circunstancia de que su condición medioambiental es una variable a tener en cuenta en tres de los criterios medioambientales (caracterización del hormigón, caracterización de las armaduras y gestión del agua). En particular, los requisitos que deben cumplir las empresas constructoras para tener compromiso medioambiental se encuentran desglosados en el Anejo,

en función de su relación con la puesta en obra del hormigón, el montaje de las armaduras y la gestión del agua.

Como consecuencia de ello, pudiera parecer que una empresa constructora podría tener compromiso medioambiental en relación con la puesta en obra del hormigón, pero no tenerlo con respecto al montaje de las armaduras ni a la gestión del agua, entre otros posibles casos. Sin embargo, fuentes del Ministerio de Fomento relacionadas con la Instrucción consideran que para que una empresa constructora tenga compromiso medioambiental debe cumplir los requisitos de los tres tipos, siguiendo un razonamiento paralelo al de los distintivos medioambientales, que no pueden ser parciales, sino de conjunto. Este razonamiento es lógico, y no parece oportuna otra interpretación.

2.1.4. Consideraciones con respecto a las distancias de transporte

El Anejo indica, literalmente, que las puntuaciones a usar en el criterio que nos ocupa: “se corresponden con unas distancias máximas de transporte de 45 Km y 300 Km para el hormigón preparado y para los elementos prefabricados, respectivamente. En el caso de que dicha distancia fuera mayor, el valor del coeficiente $\lambda_{1,3}$ correspondiente a la instalación de prefabricación se reducirá en 5 y el correspondiente a la empresa constructora se aumentará en 5, salvo en la fila correspondiente a ‘Otros casos’ que seguirá siendo 0”.

Es obvio que en esta parte del texto hay varias erratas. En primer lugar, no tiene sentido penalizar (restar) 5 puntos por transportar el hormigón desde más allá de una cierta distancia límite, para después volver a sumar de nuevo dicha puntuación, llegando con ello al mismo resultado que si la distancia de transporte fuese menor. Es evidente que el aumento de dicha distancia incrementa el consumo de combustibles fósiles, las emisiones de CO₂ y otros contaminantes, así como la generación de partículas como resultado del rozamiento entre neumáticos y pavimento vial, entre otros aspectos. Por tanto:

- El aumento de la distancia de transporte debe ser penalizado.
- No se puede premiar (aumentar 5 puntos) a una empresa constructora que realiza un subcontrato que lleva a una mayor distancia de transporte y, por tanto, mayor contaminación.

En segundo lugar, el texto del Anejo que se acaba de referir sólo influye en el coeficien-

te $\lambda_{1,3}$, relacionado con el transporte de elementos prefabricados. Por tanto, no afecta a la distancia de transporte del hormigón preparado. Esto no es lógico, ya que ambos se transportan de la misma manera y contaminan de forma similar, por Km recorrido.

Consultadas fuentes del Ministerio de Fomento, estas se muestran de acuerdo en la necesidad de corregir este problema, si bien la realidad es que tanto ésta como cualquier otra corrección o modificación suponen un proceso burocrático muy lento. Mientras tanto, desafortunadamente, si se desea realizar una estimación acorde a la EHE, no queda más remedio que aplicar el texto vigente. Sin embargo, los usuarios que deseen realizar una estimación adecuada, evitando estos problemas, pueden usar la aplicación informática MIVES-EHE-08mod-V02, realizada por los autores, que soluciona el problema referido (7).

2.2. Criterio medioambiental de caracterización de las armaduras

Pasemos ahora a este segundo criterio, que es similar al anterior, pero referido a la ferralla. Debido a dicha semejanza, los problemas que aparecen son también del mismo tipo. Con respecto a la posible condición medioambiental de las empresas de ferralla, una vez más, lo mejor es hacer un estudio de las empresas de ferralla ubicadas en el área de influencia de la obra, y tomar una decisión a partir de su resultado. En el área de influencia de Coruña y Ferrol la tendencia de las principales empresas es a certificarse ISO 14001 y algunas de las que todavía no lo han hecho cumplen con los requisitos para tener compromiso medioambiental. Sin embargo, existen pequeñas instalaciones que no cumplen dichos requisitos, ya que entre ellos se incluye estar en posesión de un distintivo de calidad oficialmente reconocido, cosa que no tienen todas las empresas de este tipo. Lo más prudente aquí, por tanto, es hacer esta última suposición.

En el caso de instalaciones de ferralla en obra sucede algo parecido a lo que ocurría con las centrales de hormigón en obra. Será raro que la instalación cuente con un distintivo medioambiental, pero en este caso los requisitos para el compromiso medioambiental son fáciles de cumplir.

En cuanto al suministro de ferralla por parte de diferentes empresas con distinta condición medioambiental, surge el mismo problema que había en el criterio anterior, y la solución es la misma, ponderando en función del porcentaje de ferralla suministrado por cada empresa. En cuanto al alcance del

compromiso medioambiental de la empresa constructora, sigue siendo de aplicación lo dicho en el epígrafe 2.1.3. Finalmente, vuelve a haber aquí el mismo tipo de erratas que aparecían en el criterio anterior, relativas a las penalizaciones provocadas por distancias de transporte más allá de un límite determinado. Los comentarios allí referidos (epígrafe 2.1.4) son aplicables aquí, exactamente de la misma manera.

2.3. Criterio medioambiental de optimización del armado

El tercer criterio valora la contribución asociada a la disminución en el consumo de recursos para la elaboración de la armadura, fomentando soluciones estructurales que optimicen las cuantías de armadura y simplifiquen su montaje en obra. A continuación se abordan los aspectos incluidos en el mismo.

2.3.1. Existencia de elementos armados y pretensados en la misma estructura

Con frecuencia coexisten en la obra elementos de hormigón armado con otros de hormigón pretensado. En el epígrafe 4.3.3 del Anejo, la Tabla A.13.4.3.3 y la función representativa de este criterio no dejan claro cómo actuar en estos casos. Pudiera parecer que el articulado invita a obtener una puntuación entre 0 y 100 para los elementos de hormigón armado, otra en el mismo rango para los de hormigón pretensado, y a sumarlas para obtener la puntuación final de este criterio. Sin embargo, esto provocaría que se pudiera alcanzar una puntuación máxima de 200 puntos en este criterio, lo cual va en contra del sistema empleado por el Anejo, en el cual la puntuación máxima para un criterio medioambiental es siempre de 100 puntos, salvo en el Criterio Medioambiental de Reciclado de Áridos, en el que se establece de manera explícita una puntuación máxima de 20 puntos. Por ello, la manera adecuada de evaluar este criterio en este caso es obtener las puntuaciones para cada tipo de hormigón, entre 0 y 100, y después ponderarlas en función del porcentaje en volumen de cada tipo de hormigón en el total de la estructura.

2.3.2. Sistema de unión de las armaduras

De manera análoga a lo que sucedía con la posible condición medioambiental de las empresas suministradoras de hormigón y ferralla, existe incertidumbre, en momentos iniciales del ciclo de vida del proyecto, acerca del sistema de unión empleado para la ferralla. En los elementos prefabricados el porcentaje de uniones soldadas suele ser muy alto (hasta del 90%), si bien puede

haber ciertas diferencias entre los diversos fabricantes. Por el contrario, en elementos ejecutados *in situ* ese porcentaje puede variar enormemente de unas empresas a otras, y de unas localizaciones a otras. En la estructura ejecutada *in situ* se ha extendido mucho el uso de ferralla industrializada soldada; sin embargo, también hay un uso muy extendido de ferralla atada por medios convencionales. Si bien lo mejor sería realizar un estudio de los ferrallistas de la zona, no parece oportuno invertir demasiado tiempo en ello, ya que la influencia de este aspecto en el ICES es baja.

Con todo lo dicho, y teniendo en cuenta la escasa diferencia de puntuación que se establece para este aspecto en el Anejo, de no especificarse en proyecto, parece prudente estimar inicialmente que tanto los elementos prefabricados como los ejecutados *in situ* se van a realizar al completo mediante uniones soldadas (lo cual supone un ICES menor).

2.3.3. Losas armadas con mallas electrosoldadas

El Anejo valora el ahorro de materiales que supone el uso de mallas electrosoldadas en losas de cierto tamaño (no inferior a 6 x 6 m²). El problema que existe aquí es que algunas estructuras no tienen más que elementos lineales. Así, por ejemplo, en la construcción de plantas industriales, determinados equipos de proceso se apoyan en meros esqueletos estructurales que no tienen ni cerramientos ni losas de tipo alguno. En este tipo de estructuras, si se usa un valor de entrada de 0% para esta variable, se llegaría a una injusta penalización en el valor de su ICES. En consecuencia, si la estructura no tiene ningún elemento losa del tamaño mencionado, se deben hacer los cálculos con un valor de entrada de 100% en esta variable.

2.3.4. Armaduras elaboradas con formas según UNE 36.831

La norma UNE 36.831 establece una serie de formas óptimas para la elaboración y montaje de armaduras en jaulas o emparrillados. En la EHE del año 1998 el cumplimiento de esta norma venía recogido en el propio articulado de la Instrucción (9) con lo cual, teóricamente, la mayoría de estructuras debían cumplirlo. El articulado de la EHE-08 no incluye referencias a UNE 36.831 y, sin embargo, seguramente a causa de la inercia generada por la EHE-98, la realidad de la práctica profesional es que casi todos los sistemas de armado se proyectan siguiendo las formas óptimas más habituales recogidas en dicha norma.

Por tanto, salvo en casos especiales de estructuras con armados singulares, parece prudente suponer que todas las armaduras se elaborarán con formas según UNE 36.831.

2.3.5. Porcentajes no presentes en las tablas de puntuaciones

Es habitual en el Anejo que determinados aspectos se evalúen en función del porcentaje de cumplimiento de una determinada condición. Así, por ejemplo, la Tabla A.13.4.3.3 del Anejo establece diferentes puntuaciones en función del porcentaje de armaduras elaboradas con formas según la norma UNE 36.831, o del porcentaje de losas armadas con mallas electrosoldadas. A su vez, se establecen puntuaciones para distintos porcentajes; en este caso, 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100%. Sin embargo, no se especifica cómo actuar cuando el porcentaje es intermedio a dos de las anteriores cifras. Lo correcto es interpolar entre dichos dos puntos, para obtener la valoración oportuna.

2.4. Criterio medioambiental de optimización del acero

Abordemos ahora el cuarto criterio, que valora la contribución que se obtiene mediante el reciclado de residuos férricos, la disminución de emisiones de CO₂, y el aprovechamiento de subproductos producidos en el proceso industrial. Para ello se tiene en cuenta la contribución asociada a la certificación medioambiental de la producción del acero para armaduras y a la certificación de calidad del producto acero.

Resulta difícil tener información precisa acerca de las certificaciones de las empresas siderúrgicas que producirán el acero para armaduras, y de las de dicho producto, comenzando por la habitual incertidumbre existente acerca de la identidad de la empresa que finalmente suministrará la ferralla. Por un lado, las empresas siderúrgicas españolas cuentan, como mínimo, con certificación ISO 14001. Además, el acero que producen suele tener distintivo de calidad (10). Pudiera ser oportuno hacer estas dos suposiciones, si se pudiera asegurar que el acero procederá de producción nacional. Sin embargo, en España se consume un importante porcentaje de acero procedente del extranjero, con características muy diversas en materia de certificación. Por tanto, lo mejor sería realizar un pequeño sondeo de los posibles suministradores de ferralla, con objeto de conocer la procedencia y características de su acero. De todas formas, incluso en el caso de que el acero no sea español, si el ferrallista tiene distintivo de calidad para su producto, lo cual es poco

frecuente todavía (del orden de 50 empresas en toda España) (10), entonces el acero siempre va tener distintivo de calidad.

El Anejo también valora si el acero cuenta con un distintivo de calidad que certifique:

- Que la producción se realiza a partir de chatarra en un porcentaje superior al 80 %.
- Que se cumplen las exigencias del Protocolo de Kyoto.
- Y que se realiza un aprovechamiento de escorias superior al 50%.

Kyoto es un protocolo asociado a países, y no a empresas. Por tanto, si el distintivo certifica la procedencia del acero, se sabrá si se cumple o no este requisito. Por otro lado, la única posibilidad real de que el acero proceda de un país no firmante es que su origen sea estadounidense (el resto son Afganistán, El Sahara y Somalia) (11). En España la regulación de este protocolo está basada en la Ley 1/2005, que resulta de obligado cumplimiento para las plantas siderúrgicas y de producción de clínker. En consecuencia, no hay la menor duda de que todo acero (y cemento) fabricado en España, que tenga distintivo de calidad, cumple el requisito. Lo más probable es que suceda lo mismo con otros países firmantes. En cuanto a reciclaje de chatarra y aprovechamiento de escorias la incertidumbre es mayor, y resulta más prudente suponer que no se van a cumplir estas condiciones.

De todas formas, debe tenerse en cuenta que lo habitual es que las empresas de ferralla cambien de proveedor en función de los precios del mercado. En consecuencia, se recomienda suponer que no se cumplen ninguna de las condiciones referidas en este epígrafe, mientras no se pueda anticipar el país de procedencia del acero. La única excepción a esto es lo dicho con anterioridad en relación a que si el ferrallista tiene distintivo de calidad para su producto, entonces el acero siempre va tener distintivo de calidad.

2.5. Criterio medioambiental de sistemática del control de la ejecución

El quinto criterio valora la contribución asociada a la disminución en el consumo de recursos al emplear un coeficiente de seguridad reducido para el acero, como consecuencia de llevar a cabo un nivel de control de ejecución intenso y emplear productos con distintivo de calidad.

El primer aspecto no debe generar problema alguno. Si se trata de estructuras calculadas

y dimensionadas por el propio proyectista, el coeficiente de seguridad es conocido desde el principio por dicho técnico, y figura en el proyecto facultativo. Si se trata de elementos prefabricados dimensionados por el fabricante, se puede asegurar que el coeficiente de seguridad usado será el reducido, pues al prefabricador no le interesa otra cosa.

En cuanto a la posibilidad de que los elementos prefabricados dispongan de distintivo de calidad, esto es más difícil de anticipar. La realidad del mercado a la fecha es que existen muy pocos elementos prefabricados con este tipo de distintivo (10), incluso aunque dichos elementos sean producidos por empresas certificadas en materia de calidad. Por tanto, lo aconsejable en este caso es suponer, en principio, la ausencia de distintivo.

2.6. Criterio medioambiental de reciclado de áridos

Tratemos ahora el sexto criterio, que valora la disminución en el consumo de recursos provocada por la utilización de árido reciclado en la fabricación de hormigones. A día de hoy el empleo de árido reciclado es muy reducido o casi nulo. Aunque la propia Instrucción contempla la posibilidad de emplear árido obtenido a partir de residuos de hormigón, de momento las empresas no están comercializando hormigones con este tipo de áridos de manera habitual. Si el proyectista ha tomado la decisión de usar este tipo de hormigones, a pesar de todo pudieran surgir dudas acerca del porcentaje final de árido reciclado, ante lo cual parece oportuno suponer porcentajes del orden del 10% o menores. En otro caso, lo lógico y recomendable es suponer que no se va a usar este tipo de árido.

2.7. Criterio medioambiental de optimización del cemento

El siguiente criterio tiene ciertas similitudes con el de optimización del acero. Valora la contribución asociada al empleo de subproductos industriales, a la minimización de las emisiones de CO₂, a los procesos industriales que permitan reducir el consumo de energía, al consumo de combustibles alternativos y a la valorización de residuos. Para ello tiene en cuenta la certificación medioambiental de la producción del cemento, la certificación de calidad de dichos cementos y la posibilidad de que el hormigón tenga distintivo de calidad.

Con respecto al posible distintivo de calidad del producto hormigón, la situación actual en España es que muy pocas centra-

les de hormigón poseen este tipo de distintivo para su producto (10). Por tanto, ante la duda, lo oportuno es suponer que no se va a cumplir dicho requisito.

En lo relativo a la certificación medioambiental de la producción del cemento, hay que reseñar que las cementeras españolas tienen, como mínimo, la certificación ISO 14001. Además, sus cementos tienen distintivo de calidad. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurriría con el acero, la gran mayoría de fabricantes de hormigón suelen usar cementos fabricados en España. Por tanto, se puede estimar que el cemento va a tener distintivo de calidad y que su producción estará certificada medioambientalmente. Lo mismo se puede decir con respecto al cumplimiento de las exigencias del protocolo de Kyoto, por las razones referidas con anterioridad.

La cosa es diferente en lo relacionado con que el distintivo certifique un determinado contenido de adiciones en el cemento, el uso de combustibles alternativos o la utilización de materias primas que produzcan menos emisiones de CO₂. Lo habitual es desconocer esta información mientras no se sepa cuál es la fábrica de procedencia del cemento utilizado. Por lo tanto, salvo disposición expresa en el proyecto facultativo, parece prudente suponer que, en principio, no se cumple ninguna de estas condiciones.

2.8. Criterio medioambiental de optimización del hormigón

Abordemos a continuación el octavo criterio, que valora la contribución provocada por el empleo de subproductos industriales como las cenizas volantes y el humo de sílice, incorporados directamente al hormigón en forma de adiciones; esto supone el doble beneficio relativo a la mejora de las propiedades del hormigón y a la eliminación de dichos residuos (sumidero ambiental). El uso de cenizas volantes y humo de sílice en los cementos está muy estudiado y es muy frecuente. Sin embargo las adiciones de estos subproductos directamente al hormigón están menos estudiadas, y su uso menos extendido, al margen de ser incompatibles con el uso de cementos con adiciones. Por tanto, lo más prudente en estos casos es suponer un contenido nulo de estas adiciones.

2.9. Criterio medioambiental de control de los impactos

El noveno criterio valora la contribución asociada a la implantación en obra de medidas que minimicen los impactos sobre el

medio ambiente, especialmente en lo relativo a la emisión de partículas. Para ello se premia el uso de aspersores y estabilizantes químicos para reducir la producción de polvo; o la pavimentación de los accesos a la obra y el uso de sistemas de limpieza de neumáticos, para evitar la propagación del polvo y barro que suelen causar en determinados momentos los vehículos que salen de la obra.

Es difícil estimar con qué frecuencia se suelen tomar en obra estas medidas. En ocasiones las ordenanzas de ayuntamientos o comunidades autónomas obligan a tomar algunas de ellas para determinados tipos de obra. Independientemente de esto, en determinadas circunstancias, como puede ser la proximidad a un colegio o a un centro de salud, se hace imprescindible implantar algunas de ellas, ya que de lo contrario los trastornos ocasionados pueden llegar a ser importantes. Sin embargo, lamentablemente, lo habitual en España es que en la mayoría de las obras no se cuiden estos aspectos. Por lo tanto, y salvo que el Pliego de Condiciones del proyecto establezca dichas medidas, las estimaciones iniciales más conservadoras deben suponer su ausencia.

2.10. Criterio medioambiental de gestión de los residuos

Pasemos ahora al décimo criterio, que valora la contribución que supone disponer de un plan para la gestión de los residuos generados en la obra, así como la minimización de los desechos de azufre y hormigón mediante el empleo de probetas cúbicas, en lugar de cilíndricas. A continuación se abordan los aspectos incluidos en el mismo.

2.10.1. Plan de gestión de residuos de construcción y demolición

Actualmente, el Real Decreto 105/2008 obliga a que el proyecto de ejecución incluya un estudio de gestión de los residuos de construcción y demolición que se generarán en la obra (12). Por tanto, al terminar el proyecto facultativo el proyectista va a tener la información oportuna para evaluar esta parte del Anejo, y en momentos anteriores debería tener ciertas ideas claras que le permitan realizar dicha valoración. Con respecto a los productos de excavación la situación es similar; si bien no existe legislación específica sobre estudios o planes de gestión de estos productos, los excedentes de excavación no utilizados se convierten automáticamente en residuos de construcción y, por lo tanto, deben incluirse en el plan de gestión de residuos. El Real Decreto 105/2008 no incluye los excedentes de tie-

rras de la obra pública, pero dichos excedentes se ven afectados por la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de Proyectos (13), quedando en una situación similar a la comentada.

2.10.2. Tipo de probetas utilizadas para el control de calidad

Llama la atención que en la tabla A.13.4.3.10 del Anejo solamente se realicen valoraciones relacionadas con el tipo de probetas, cúbicas o cilíndricas, que se utilizan para el control de calidad de los hormigones que carecen de distintivo. Es cierto que un hormigón que tiene distintivo de calidad requiere probar una menor cantidad de probetas para su control y, por lo tanto, se minimizan los recursos consumidos. Pero también lo es que los hormigones con distintivo requieren la realización de probetas, por lo que el Anejo también debería establecer valoraciones en función del tipo de probetas (cúbicas o cilíndricas) utilizadas para su control. Este debería ser uno de los aspectos a revisar en próximas versiones del Anejo, pero por ahora hay que ceñirse al texto vigente.

En cuanto a la situación actual del sector en lo referente al tipo de probetas mayoritariamente utilizadas, la realidad es que todavía no hay muchas entidades de control que realicen sus pruebas mediante probetas cúbicas. El alto coste de los moldes cúbicos, unido a la larga experiencia que tienen acumulada dichas entidades en el ensayo de probetas cilíndricas, son algunas de las razones por las que todavía no se ha extendido más el uso de probetas cúbicas. Por lo tanto, en caso de no especificarse en el Pliego de Condiciones, lo más prudente será suponer el empleo de probetas cilíndricas.

Al margen de lo anterior, en esta parte del criterio se tiene en cuenta la posibilidad de que el hormigón tenga distintivo de calidad ante lo cual, al igual que se hacía en el criterio medioambiental de optimización del cemento (epígrafe 2.7), y por las mismas razones allí explicadas, lo prudente es suponer que el hormigón no va a disponer de dicho distintivo.

2.11. Criterio medioambiental de gestión del agua

Este es el último de los criterios medioambientales, y valora la contribución asociada a una gestión adecuada del agua empleada en la obra (y sólo en el sitio de la obra), teniendo en cuenta el posible uso de técnicas de curado eficientes en relación al consumo de agua, el uso de contenedores para la

recogida y reutilización del agua de lluvia, o el empleo de dispositivos para el ahorro de agua en los puntos de consumo.

Hay varios aspectos que pueden influir en lo que finalmente suceda en obra con respecto a la gestión del agua, pudiendo haber diferencias importantes en función de la situación geográfica, entre otras cosas. Así, por ejemplo, en determinados lugares del sur y sureste de España en los que el agua es un bien escaso y muypreciado, existe una mayor cultura del ahorro de agua que en otras zonas más favorecidas por las precipitaciones. La época del año puede influir también en la aplicación de determinados aspectos recogidos en el Anejo. Así, por ejemplo, los resultados de disponer contenedores para la recogida de agua de lluvia durante el verano andaluz no tienen porqué ser de mucha ayuda.

Por tanto, parece oportuno analizar la ubicación y condiciones particulares de la obra y las costumbres constructivas de la zona y, ante la duda, en la ausencia de especificaciones de este tipo en el proyecto facultativo, lo prudente es no contar con las medidas referidas.

2.12. Criterio de contribución social

Con todo lo antedicho terminan los comentarios relacionados con los criterios medioambientales, y cumple ahora hablar de los relativos a lo social y de extensión de la vida útil. En el primero de ellos se pretende valorar la contribución a la sostenibilidad provocada por una serie de aspectos sociales entre los que se incluyen la aplicación de métodos innovadores derivados de la I+D, la formación del trabajador, la información al ciudadano sobre la obra y sus implicaciones económicas y sociales, o el interés general de la propia obra. La mayoría de estos aspectos son claros y no deberían suscitar dudas ni problemas a la hora de la evaluación. Únicamente el último podría suponer alguna duda que, sin embargo, debe poder despejarse con facilidad, ya que el interés general es una figura legislativa que debe ser otorgada a la obra por la Administración Pública competente.

2.13. Criterio de contribución por extensión de la vida útil

El último criterio que se tiene en cuenta para la obtención del ICES está relacionado con la vida útil para la que se ha proyectado la estructura. Se trata esencialmente de un criterio económico, aunque en realidad tiene consecuencias sobre lo medioambiental. El Anejo considera que si la es-

tructura se proyecta y construye para una vida útil superior a la mínima exigida por la EHE, se está contribuyendo a la sostenibilidad. En primer lugar, porque se soluciona un problema técnico durante más tiempo, con un presupuesto que no debería ser muy superior. Y en segundo lugar porque se tarda más tiempo en generar de nuevo una agresión al medio ambiente (cuando haya que construir otra estructura que sustituya a la existente).

Aquí no debería haber problemas importantes, una vez comprendida la diferencia entre vida útil mínima ($t_{g,min}$) y vida útil contemplada en el proyecto para la estructura (t_g). Por un lado, t_g es el valor de vida útil para el que se proyecta la estructura, duración que se conseguirá en base a una adecuada selección de los tipos estructurales y de los materiales de construcción, dosificaciones y recubrimientos apropiados, ejecución cuidadosa conforme al proyecto, control de proyecto, ejecución y explotación ajustados a las necesidades que plantea dicha vida útil, y uso y mantenimiento apropiados, entre otros aspectos. Por su parte, $t_{g,min}$ es la vida útil nominal establecida en la Tabla 5.1 del Art. 5 la EHE. La Instrucción obliga a que la estructura se proyecte para dicha vida útil mínima, que toma diferentes valores en función del uso que se vaya a hacer de dicha estructura. Dicha obligatoriedad implica que el parámetro $b = t_g / t_{g,min}$ nunca podrá ser menor a la unidad.

3. CONCLUSIONES

La introducción de un anejo sobre evaluación de la sostenibilidad en una Instrucción de hormigón estructural, por vez primera en el ámbito internacional, es un pequeño pero importante paso que, combinado con otros, podría permitir cimentar cambios importantes en el sub-sector de las estructuras de hormigón, y quizá también en el propio sector de la construcción, que lleven a un sector más sostenible y, en combinación con otras fortalezas, mejor preparado para afrontar los retos que le esperan en los próximos tiempos.

Como con toda normativa nueva, y más en este caso, que supone la consideración no sólo de aspectos técnicos sino también sociales y de gestión, puede haber algunos problemas de interpretación y aplicación, que los autores consideran resueltos con todo lo dicho en este artículo. Aún así, calcular el ICES final de la estructura es una tarea relativamente sencilla que no debe suponer problemas importantes para el director de obra, salvo los del mero seguimiento de la ejecución de la estructura,

con objeto de registrar documentalmente todo lo necesario para certificar dicho ICES final.

Sin embargo, para tener ciertas posibilidades de cumplir el objetivo de sostenibilidad planteado se hace necesario realizar una tarea continua de gestión, a todo lo largo del ciclo de vida del proyecto, realizando estimaciones periódicas del ICES que permitan tener una idea clara, en cada momento, de las posibilidades de cumplir dicho objetivo. La incertidumbre que existe en momentos tempranos del proyecto, incluso cuando ya se ha realizado la contratación y la obra ha comenzado, supone diversos problemas y dudas acerca de la mejor manera de realizar estimaciones del potencial ICES final. El presente artículo ha propuesto soluciones a todo ello; los autores esperan y desean que esto resulte de utilidad para el fomento de la evaluación de la sostenibilidad de las estructuras de hormigón y, en general, para el diseño sostenible de las mismas.

En todo caso, queda mucho camino por andar. Es necesario trabajar a fondo en el campo de la evaluación de la sostenibilidad de las estructuras metálicas y de madera, así como del resto de los sistemas constructivos. El propio Anejo 13 de la EHE

es susceptible de posteriores desarrollos y mejoras, como las que se proponen en las referencias (3) y (14). Y es preciso afrontar cuanto antes todos estos trabajos, para fortalecer la normativa y el sector, fomentando el proyecto sostenible de edificaciones y otras instalaciones e infraestructuras.

AGRADECIMIENTOS

Estos trabajos han tenido lugar en el marco de dos proyectos financiados, respectivamente, por la Xunta de Galicia (proyecto código 08TMT011166PR), y el Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto código BIA2010-20789-C04-02).

Queremos agradecer también la amable ayuda que han prestado diversas personas de diferentes empresas e instituciones, y especialmente al Prof. D. Antonio Aguado (Universidad Politécnica de Cataluña), D. Lino Ameneiro (Ingefer; Universidad de la Coruña), D.^a Belén González Fonteboa (Universidad de la Coruña), D. Alejandro Josa (Universidad Politécnica de Cataluña), D. Fernando Martínez Abella (Universidad de la Coruña), D.^a Isabel Martínez Lage (Universidad de la Coruña), D. Santiago Ortiz (PRECON; Grupo Molins) y D.^a Cristina Vázquez (Universidad de la Coruña).

REFERENCIAS

- (1) Ministerio de la Presidencia. (2008, 22 de agosto). Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08). *Boletín Oficial del Estado*, 203, pp. 35176-35178. Anejo 13 de la Instrucción, pp. 487-504.
- (2) Gómez, D., del Caño, A., de la Cruz, M.P., Purriños, R. (2010). Managing uncertainty in the sustainable design of concrete structures. *Selected Proceedings of the XIV International Congress on Project Engineering*. pp. 101-113, Asociación Española de Ingeniería de Proyectos (AEIPRO) e International Project Management Association (IPMA). Madrid.
- (3) Aguado, A., del Caño, A., de la Cruz, M.P., Gómez, D., Josa, A. (2012). Sustainability assessment of concrete structures within the Spanish structural concrete code. *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, 2(138): 268-276.
- (4) Gómez, D., del Caño, A., de la Cruz, M.P., Josa, A. Metodología genérica para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas constructivos. El método MIVES. *Sostenibilidad y construcción*. Editor: A. Aguado. Asociación Científico-Técnica del Hormigón (ACHE). Cap. 18, pp. 385-411.
- (5) Gómez, D., del Caño, A., de la Cruz, M.P., Josa, A. Evaluación de la sostenibilidad en estructuras de hormigón y metálicas. La EHE y la EAE. *Sostenibilidad y construcción*. Editor: A. Aguado. Asociación Científico-Técnica del Hormigón (ACHE). Cap. 19, pp. 413-439.
- (6) Gómez, D., del Caño, A., de la Cruz, M.P. (2009). Sustainability assessment of concrete structures using the Spanish code EHE-2008. Reflections and recommendations. *Selected Proceedings of the XIII International Congress on Project Engineering*. pp. 75-83, Asociación Española de Ingeniería de Proyectos (AEIPRO) e International Project Management Association (IPMA). (Badajoz).
- (7) GRIDP (Grupo de Ingeniería y Dirección de Proyectos). (2011). Software para el cálculo del ICES según la EHE-08, y según otros modelos similares, <http://www.ii.udc.es/GRIDP/castellano/software.html>
- (8) Gómez, D., de la Cruz, M.P., del Caño, A., Arroyo, I. (2012). Herramienta de cálculo para la evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón según la instrucción Española EHE-08. *Dyna*, 2(87): 180-189.

- (9) Ministerio de Fomento. (1999, 13 de enero). Real Decreto 2661/1998, de 11 de diciembre, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE). *Boletín Oficial del Estado*, 11, pp. 1525-1526.
- (10) Ministerio de Fomento. (2011, 1 de julio) Reconocimiento de Distintivos. http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ORGANOS_COLEGIADOS/CPH/Distintivos/
- (11) UNFCCC (Convención sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas). (2009, 14 de enero). Kyoto Protocol. Status of Ratification, http://unfccc.int/files/kyoto_protocol/status_of_ratification/application/pdf/kp_ratification.pdf
- (12) Ministerio de la Presidencia. (2008, 13 de febrero). Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. *Boletín Oficial del Estado*, 38, pp. 7724-7730.
- (13) Ministerio de Medio Ambiente. (2008, 26 de enero). Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos. *Boletín Oficial del Estado*, 23, pp. 4986-5000.
- (14) del Caño, A.; de la Cruz, M.P. (2008). Bases y criterios para el establecimiento de un modelo de evaluación de la sostenibilidad en estructuras de hormigón. *Cemento y Hormigón*, 913, pp. 6-14.

* * *